

MODIFIKASI SILIKA MESOPORI MCM-48 DENGAN LIGAN 1,5-DIFENILTIOKARBASON UNTUK ADSORPSI ION LOGAM Pb^{2+}

Ariyanugrah Wibawa*, Paulina Taba, Musa Ramang

Laboratorium Kimia Fisika, Universitas Hasanuddin

Kampus UNHAS Tamalanrea, Makassar, 90245

*email : wibawaaryanugrah@yahoo.co.id

ABSTRAK

Penelitian modifikasi silika mesopori, MCM-48, menggunakan ligan 1,5-difeniltiokarbazon telah berhasil dilakukan. Produk yang diperoleh dikarakterisasi dengan menggunakan Difraksi Sinar-X (XRD) dan spektrofotometer FTIR. Hasil modifikasinya (NH-MCM-48) digunakan untuk mengadsorpsi ion Pb^{2+} . Adsorpsi ion Pb^{2+} dipelajari dengan variasi waktu kontak, pH dan konsentrasi. Isotermal yang digunakan mempelajari adsorpsi ion Pb^{2+} oleh NH-MCM-48 yaitu isotermal Langmuir dan Freundlich. Selain itu, desorpsi dilakukan dengan menggunakan larutan HNO_3 , HCl , Na_2EDTA , dan H_2O . Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi ion Pb^{2+} oleh NH-MCM-48 sesuai dengan reaksi orde dua semu dan mengikuti isotermal Langmuir dengan nilai kapasitas adsorpsi sebesar $20,79 \text{ mg.g}^{-1}$ atau $0,100 \text{ mmol.g}^{-1}$. Larutan yang paling efektif mendesorpsi ion Pb^{2+} dari NH-MCM-48 adalah HNO_3 0,3 M dengan persen terdesorpsi 92,33%

Kata Kunci: Adsorpsi, Desorpsi, MCM-48, NH-MCM-48, Pb^{2+}

ABSTRACT

A research on modification of mesoporous silica, MCM-48, by using 1,5-difeniltiokarbazon has been successfully done. Product obtained characterized by using X-Ray Diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared (FTIR) spectrophotometer. The modified result (NH-MCM-48) used to adsorb Pb^{2+} ion. The adsorption of ion Pb^{2+} was studied by various contact times, pHs, and concentrations. The adsorption isotherm which is used to study the adsorption of Pb^{2+} ion by NH-MCM-48 were Langmuir and Freundlich isotherm. Desorption process using HNO_3 , HCl , Na_2EDTA solutions as well as water was also studied. The results showed that the adsorption of Pb^{2+} ion in accordance with pseudo second order and in accordance with Langmuir isotherm with adsorption capacity value of $20,79 \text{ mg.g}^{-1}$ or $0,10 \text{ mmol.g}^{-1}$. The most effective solution to desorb Pb^{2+} ions from NH-MCM-48 was HNO_3 0.3 M with desorption percentage 92.33%.

Keywords: adsorption, desorption, MCM-48, NH-MCM-48, Pb^{2+}

1. PENDAHULUAN

Pembangunan di sektor industri, perhotelan, rumah sakit dan sektor lainnya akhir-akhir ini berkembang sangat pesat. Perkembangan industri ini memberikan dampak positif seperti kenaikan devisa negara. Namun demikian, selain memiliki dampak positif, perkembangan di sektor industri juga memberikan dampak yang negatif yaitu dihasilkannya limbah industri yang akan mengganggu keseimbangan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik dan benar (Hamid dan Pramudyanto, 2007). Salah satu limbah yang menarik perhatian dunia adalah logam berat karena di dalam perairan logam ini tidak dapat didegradasi secara biologis (Fardiaz, 1992).

Logam berat adalah unsur-unsur kimia dengan densitas lebih besar dari 5 g/cm³. Salah satu logam berat pencemar yang berasal dari bidang industri adalah logam timbal. Sifat logam timbal yang mudah membentuk aloi dengan berbagai jenis logam lainnya membuat logam ini banyak digunakan dalam berbagai industri. Logam timbal digunakan antara lain dalam industri baterai, kabel, penyepuhan, pestisida, sebagai zat antiletup pada bensin, zat penyusun patri atau solder, sebagai formulasi penyambung pipa sehingga memungkinkan terjadi kontak antara air dengan logam timbal (Widowati, dkk., 2008).

Akibat penggunaan logam timbal yang sangat luas di bidang industri pencemaran logam timbal kemungkinan menjadi semakin besar. Pencemaran lingkungan oleh logam timbal dapat berbahaya bagi kesehatan manusia. Timbal merupakan logam yang sangat beracun dan dapat mempengaruhi setiap organ dan sistem dalam tubuh manusia. Anemia adalah gejala awal keracunan timbal. Timbal dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui pernapasan, makanan dan kontak dengan kulit. Target utama dari keracunan timbal adalah sistem saraf dan

bila dikonsumsi dalam jumlah yang lebih besar dapat merusak otak dan ginjal. Pada tahun 2013, WHO memperkirakan keracunan timbal yang mengakibatkan 143.000 kematian dan kasus ketidakmampuan intelektual pada anak-anak sebanyak 600.000 setiap tahunnya (Sembel, 2015).

Logam timbal menimbulkan dampak yang bahaya karena keberadaan logam tersebut di perairan harus dikurangi. Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk mengurangi keberadaan logam timbal di lingkungan adalah dengan metode adsorpsi. Adsorpsi adalah pengambilan molekul dari gas atau cairan oleh suatu padatan. Pada saat adsorpsi, zat yang diserap menempel pada permukaan padatan, tidak sampai ke bagian dalam dari padatan. Teknik ini banyak digunakan karena prosesnya sederhana dan berbagai adsorben dapat digunakan (Sediawan, 2000).

Adsorben yang saat ini sedang menarik perhatian para peneliti adalah material berpori. Berdasarkan ukuran porinya, material berpori dibagi dalam tiga golongan yaitu mikropori yang memiliki diameter kurang dari 2 nm, mesopori yang memiliki diameter 2- 50 nm dan makropori yang memiliki diameter lebih besar dari 50 nm (Taba, 2008). Salah satu material mesopori ini adalah M41S yang terdiri atas tiga jenis material: (1) MCM-41 (*Mobile Crystalline Materials number 41*), mempunyai struktur heksagonal; (2) MCM-48 (*Mobile Crystalline Materials number 48*) mempunyai struktur kubik; dan (3) MCM-50 (*Mobile Crystalline Materials number 50*) yang mempunyai struktur lamellar dan tidak stabil. Silika mesopori MCM-48 merupakan senyawa yang memiliki kerangka 3 dimensi (Vartuli, 1994). MCM-48 dengan saluran tiga dimensi yang saling berhubungan sehingga material ini memiliki potensi yang lebih besar untuk berbagai aplikasi dibandingkan material mesopori lainnya karena pada MCM-48 difusi adsorbat lebih cepat dan pemblokiran pori dapat dihindari (Shim dkk., 2005).

Permukaan silika mesopori MCM-48 memiliki gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si). Gugus ini kurang efektif berinteraksi dengan ion logam karena rendahnya kemampuan oksigen pada gugus tersebut sebagai donor pasangan elektron, yang mengakibatkan ikatan antara ion logam dengan permukaan silika menjadi lemah. Oleh karena itu modifikasi permukaan silika mesopori perlu dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsinya (Sriyati dkk., 2005). Modifikasi permukaan silika dapat dilakukan dengan penambahan gugus fungsional organik sebagai pengompleks logam berat (Buhani dkk., 2009). Pada penelitian ini silika mesopori MCM-48 akan disintesis dan dimodifikasi menggunakan ligan ditizon atau biasa disebut 1,5-difeniltiokarbazon (MCM-48-NH). Ditizon (1,5-difeniltiokarbazon) merupakan salah satu ligan organik yang banyak digunakan karena mempunyai atom S dan N yang dapat berperan sebagai donor pasangan elektron (Allen dkk., 2014). Adsorpsi ion logam berat sangat dipengaruhi oleh kondisi optimum seperti pH dan waktu kontak. Oleh karena itu, Pengaruh, pH, waktu, dan konsentrasi juga akan dipelajari pada penelitian ini.

Pada penelitian kali ini juga dilakukan proses desorpsi. Proses ini dilakukan untuk mengetahui apakah adsorben dapat diregenerasi atau tidak dengan agen pendesorpsi yang sesuai agar tidak menimbulkan kerusakan pada adsorben yang telah terlepas dari ion logam serapannya sehingga dapat digunakan kembali untuk mengikat logam (Gau, 2016).

2. METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan-bahan yang akan digunakan dalam penelitian adalah $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, NaOH, HCl, Triton X-100, setil trimetil amonium bromida (CTAB), CH_3COOH , Ludox HS40, Na_2EDTA , akuades, akuabides, asam nitrat, 1,5-difeniltiokarbazon, etanol 96%, kertas saring (Whatman no. 42),

kertas pH universal, toluena p.a, dan dietil eter p.a (E. Merck).

Alat

Alat-alat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan gelas yang umum digunakan dalam laboratorium kimia, oven (*Gen Lab*), neraca analitik (*Ohaus*), *magnetic stirrer*, *hot plate stirrer*, botol polipropilena, desikator, pemanas air (*Waterbath Advantec TBS271SA*), pompa vakum (*Sargent-Welch Co. model 1400*), penyaring buchner, pH meter (*Hanna Instrumen*), FTIR (*Shimadzu 8300*), SSA (*buck scientific model 205 VGP*), dan XRD (*Paralytical X'-Pert³*).

Sintesis Silika Mesopori MCM-48

Untuk mensintesis MCM-48 digunakan metode Ryoo dkk. (1999) yang dimodifikasi oleh Taba (2008). Surfaktan dihilangkan dari produk berwarna putih melalui pencucian dengan campuran HCl-etanol. Satu gram MCM-48 dicuci dengan 25 mL HCl 0,1 M dalam larutan etanol 50 % sambil diaduk selama 30 menit pada suhu kamar. Pencucian diulangi sekali lagi kemudian campuran disaring, endapan dicuci dengan air suling dan dikeringkan pada suhu 100 °C. Silika mesopori MCM-48 dikarakterisasi menggunakan XRD dan FTIR.

Modifikasi Silika Mesopori MCM-48

Sebanyak 0,12 gram (0,5 mmol) 1,5-difeniltiokarbazon dimasukkan ke dalam campuran 10 mL toluena dan 5 mL etanol kemudian diaduk sampai larut sempurna. Sebanyak 0,5 gram silika mesopori MCM-48 dimasukkan ke dalam larutan, kemudian diaduk dengan pengaduk magnet selama 4 jam, lalu disaring, dicuci dengan 5 mL toluena, 5 mL etanol dan 5 mL dietil eter, kemudian dikeringkan pada 60 °C dalam oven. Selanjutnya MCM-48 yang telah termodifikasi 1,5-difeniltiokarbazon dikarakterisasi dengan FTIR dan XRD (Sudiarta dkk., 2013).

Penentuan pH Optimum Adsorpsi

Silika mesopori termodifikasi, NH-MCM-48, masing-masing sebanyak 0,1 gram dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang berisi 50 mL larutan Pb^{2+} $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, kemudian campuran diaduk selama waktu optimum dengan variasi pH 3, 4, 5, 6, 7 dan 8. Campuran tersebut disaring menggunakan penyaring vakum dengan kertas saring Whatman 42. Absorbansi filtrat diukur dengan menggunakan spektrofotometer serapan atom. Konsentrasi yang teradsorpsi untuk tiap pH dihitung dengan menggunakan persamaan (8). pH optimum adsorpsi adalah pH dimana jumlah ion Pb^{2+} yang teradsorpsi (C_{ads}) terbesar.

Penentuan Waktu Optimum Adsorpsi

Silika mesopori termodifikasi, NH-MCM-48, masing-masing sebanyak 0,1 gram dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang berisi 50 mL larutan Pb^{2+} $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Campuran diaduk dengan magnetik stirer selama 10 menit lalu disaring. Absorbansi filtrat diukur dengan menggunakan spektrofotometer serapan atom. Percobaan diulangi dengan variasi waktu pengadukan berturut-turut 20, 40, 60, 80 dan 160 menit.

Penentuan Kapasitas Adsorpsi

Silika mesopori termodifikasi, NH-MCM-48, masing-masing sebanyak 0,1 gram dimasukkan ke dalam 5 erlenmeyer berbeda yang berisi 50 mL larutan Pb^{2+} dengan variasi konsentrasi 20, 40, 80, 160 dan $320\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Larutan kemudian diaduk selama waktu optimum. Campuran tersebut disaring menggunakan penyaring vakum dengan kertas saring Whatman 42. Absorbansi filtrat diukur dengan menggunakan spektrofotometer serapan atom.

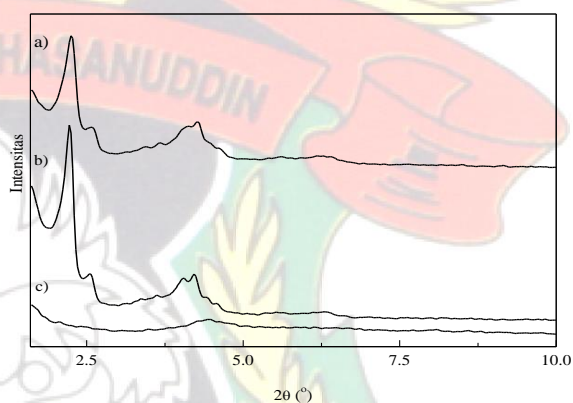
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis X-ray Diffraction

Pada gambar 1 dapat dilihat pola difraksi sinar-X untuk MCM-48 sebelum, setelah 4 kali cuci, dan setelah modifikasi. Pola

difraksi sinar-X MCM-48 sebelum pencucian (Gambar 1a) menunjukkan adanya puncak 2θ yang kuat pada $2,25^\circ$, $4,24^\circ$, $2,58^\circ$, dan $3,45^\circ$. Selain itu masih terdapat puncak-puncak dengan intensitas rendah. Puncak-puncak tersebut merupakan puncak yang khas untuk MCM-48 sebagaimana yang telah diperoleh peneliti sebelumnya (Pongsendana, 2013; Taba, 2001).

Pola difraksi sinar-X untuk MCM-48 setelah 4 kali pencucian memperlihatkan bahwa struktur MCM-48 masih dapat dipertahankan, namun setelah dimodifikasi dengan ligand ditizon keteraturan pori dari MCM-48 tidak dapat dipertahankan. Terbukti dengan tidak terlihatnya puncak-puncak dengan intensitas yang tinggi.



Gambar 1. Pola difraksi MCM-48

Analisis FTIR

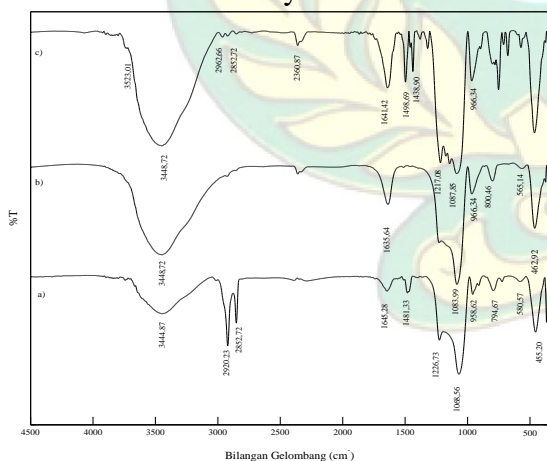
Gambar 2. menunjukkan spektra inframerah untuk MCM-48 sebelum pencucian, MCM-48 setelah 4 kali cuci, dan NH-MCM-48.

Pada spektrum inframerah MCM-48 sebelum pencucian (Gambar 7a), terdapat pita serapan dengan bilangan gelombang $3444,87\text{ cm}^{-1}$ yang merupakan vibrasi OH dari gugus Si-OH. Hal ini didukung oleh pita serapan dengan bilangan gelombang $958,62\text{ cm}^{-1}$ dan $580,57\text{ cm}^{-1}$ yang merupakan vibrasi ulur Si-O dari Si-OH. Bilangan gelombang 1068 cm^{-1} dan 1226 cm^{-1} merupakan vibrasi ulur asimetri dari Si-O-Si. Vibrasi ulur simetris dari Si-O-Si ditunjukkan pada pita serapan dengan bilangan gelombang $794,67\text{ cm}^{-1}$ dan

didukung oleh vibrasi tekuk Si-O-Si pada bilangan gelombang 455,20 cm^{-1} . Pita serapan dengan bilangan gelombang 2920,23 cm^{-1} dan 2852,72 cm^{-1} merupakan vibrasi regangan asimetris dan simetris dari CH yang merupakan *peak* dari surfaktan yang didukung oleh gugus metilen (CH_2) pada bilangan gelombang 1481,33 cm^{-1} .

Spektrum MCM-48 setelah pencucian 4 kali yang menggunakan campuran HCl-etanol pada Gambar (7b), menunjukkan intensitas CH berkurang yang menunjukkan hilangnya surfaktan. Pita serapan dengan bilangan gelombang 1226,73 cm^{-1} dan 1068,56 cm^{-1} bergeser ke bilangan gelombang lebih besar yang menunjukkan adanya kontraksi kisi dengan hilangnya surfaktan (Taba,2001).

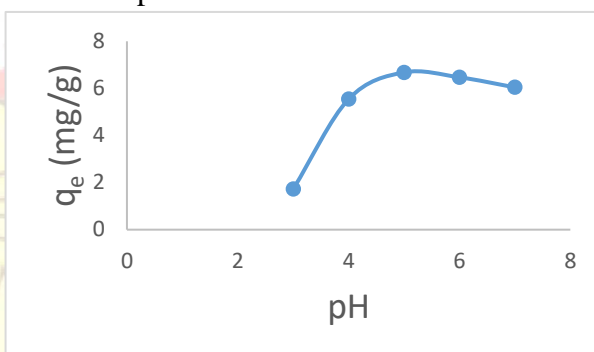
Keberhasilan modifikasi NH-MCM-48 ditunjukkan oleh munculnya serapan dengan intensitas lemah pada daerah 3500 cm^{-1} di samping gugus $-\text{OH}$ yang menunjukan regangan asimetris dari gugus $-\text{NH}$ sekunder dari ditizon. Hal ini diperkuat dengan munculnya serapan pada bilangan gelombang 1498 cm^{-1} yang tampak pada MCM-48 setelah termodifikasi ditizon merupakan vibrasi tekuk dari gugus $-\text{NH}$. Pada spektrum terlihat serapan tajam pada 752 cm^{-1} dan 677 cm^{-1} yang menandakan adanya monosubstitusi aromatik dari fenil pada ditizon. Selain itu, serapan pada bilangan gelombang 1641 cm^{-1} , 1319 cm^{-1} , dan 1217 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus $\text{C}=\text{N}$, $\text{C}=\text{S}$ dan $\text{C}-\text{N}$ dari senyawa ditizon.



Gambar 2. Spektra FTIR a.MCM-48; b.MCM-48 4 kali cuci; c. NH-MCM-48

Pengaruh pH pada Adsorpsi Ion Pb^{2+} oleh NH-MCM-48

Hubungan antara pH terhadap banyaknya ion Pb yang teradsorpsi dapat dilihat pada Gambar 3.



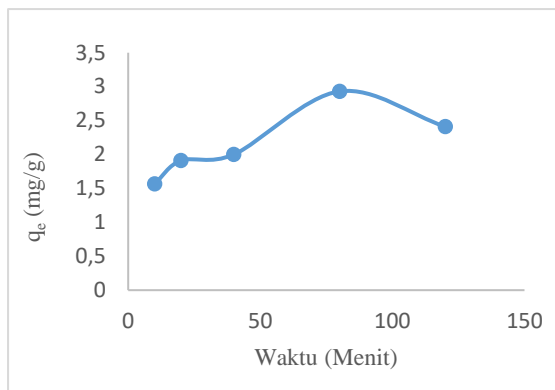
Gambar 3. Pengaruh pH pada adsorpsi ion logam Pb^{2+} oleh NH-MCM-48

Jumlah ion Pb^{2+} yang teradsorpsi pada pH 3 sampai pH 5 meningkat. Jumlah ion Pb^{2+} yang teradsorpsi hanya sebesar 1,73 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ pada pH 3 dan dengan peningkatan pH, jumlah ion Pb^{2+} yang teradsorpsi meningkat hingga pH 5 yaitu sebesar 6,67 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$. Namun setelah pH 5, jumlah ion Pb^{2+} yang diadsorpsi oleh NH-MCM-48 mengalami penurunan.

Kemampuan adsorpsi ion logam bergantung pada pH. Pada pH rendah konsentrasi ion H^+ menjadi sangat tinggi sehingga permukaan adsorben bermuatan positif. Hal ini menyebabkan tolak menolak dengan ion Pb^{2+} sehingga adsorpsi menjadi kecil. Seiring naiknya pH larutan maka adsorpsi ion logam akan mengalami peningkatan karena apabila pH semakin naik maka konsentrasi ion H^+ menurun. Namun apabila pH larutan terlalu tinggi adsorpsi ion logam akan kembali mengalami penurunan akibat terbentuknya endapan (Handayani dkk., 2012).

Pengaruh Waktu Kontak pada Adsorpsi Ion Logam Pb^{2+} oleh NH-MCM-48

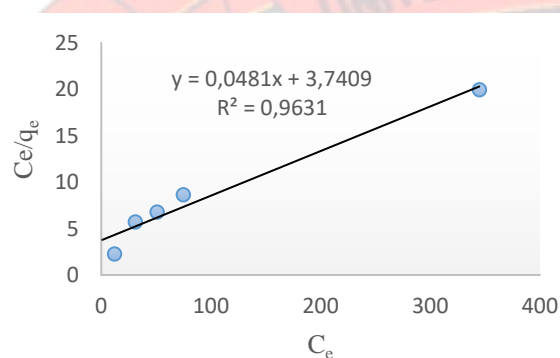
Jumlah ion logam Pb^{2+} yang diadsorpsi sebagai fungsi waktu dapat dilihat pada Gambar 4.



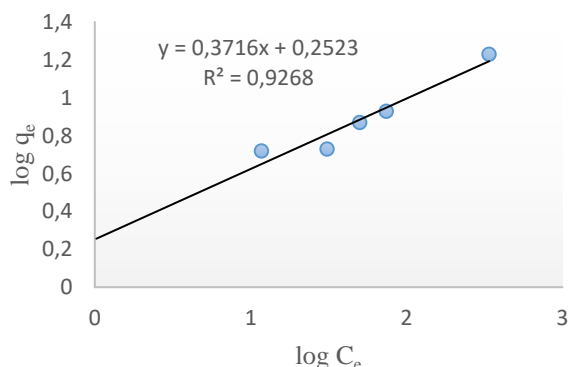
Gambar 4. Pengaruh Waktu kontak terhadap adsorpsi ion logam Pb^{2+}

Kapasitas Adsorpsi Ion Logam Pb^{2+} oleh NH-MCM-48

Isotermal Langmuir dan Freundlich adsorpsi ion logam Pb^{2+} oleh NH-MCM-48 ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6



Gambar 5. Isotermal Langmuir



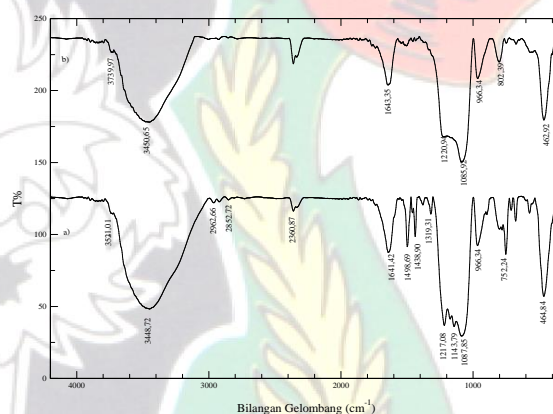
Gambar 6. Isotermal Freundlich

Nilai koefisien korelasi dari isotermal Langmuir yaitu sebesar 0,9631 dan isotermal Freundlich yaitu sebesar 0,9268.

Nilai koefisien korelasi yang diperoleh memperlihatkan bahwa adsorpsi ion Pb^{2+} oleh MCM-48 termodifikasi ditizon cenderung mengikuti isotermal adsorpsi Langmuir yang berarti adsorpsi maksimum terjadi saat semua situs aktif adsorben diisi oleh adsorbat membentuk monolayer. Nilai kapasitas adsorpsi (Q_0) yang diperoleh dari isotermal Langmuir yaitu sebesar $0,100 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ dengan intensitas adsorpsi (b) sebesar $0,013 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$. Nilai kapasitas adsorpsi (k) yang diperoleh dari isotermal Freundlich yaitu sebesar $0,0086 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ dengan intensitas adsorpsi (n) sebesar $2,69 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

Interaksi Ion Pb^{2+} dengan NH-MCM-48

Interaksi ion Pb^{2+} dengan NH-MCM-48 dipelajari dengan menggunakan FTIR. Gambar 7 menunjukkan spektra IR NH-MCM-48 sebelum dan sesudah adsorpsi ion Pb^{2+}



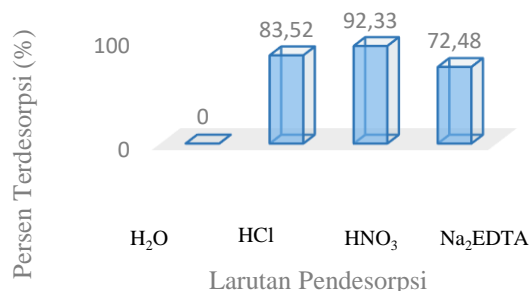
Gambar 7. Spektra IR (a) NH-MCM-48 dan (b) NH-MCM-48+ Pb^{2+}

Pita serapan pada bilangan gelombang 3521,01 yang merupakan vibrasi NH sekunder mengalami pergeseran bilangan gelombang menjadi 3739,97 setelah adsorpsi yang menunjukkan adanya peranan gugus NH dalam mengikat ion Pb^{2+} . Selain itu pita serapan pada bilangan gelombang 1498 cm^{-1} yang merupakan daerah vibrasi tekuk $-NH$ mengalami pergeseran dan intensitas puncak yang menurun setelah adsorpsi. Pada puncak 1319,31 yang merupakan daerah gugus $C=S$ juga mengalami penurunan intensitas

yang mengindikasikan gugus tersebut berperan dalam proses adsorpsi.

Desorpsi

Gambar 8 menunjukkan desorpsi ion Pb^{2+} dari adsorben NH-MCM-48



Gambar 8. Kurva Hubungan Larutan Pendesorpsi dengan Persen Ion Logam Pb^{2+} yang terdesorpsi

Persen desorpsi ion Pb^{2+} terbaik diperoleh dengan menggunakan HNO₃ 0,3M dengan persen teradsorpsi sebesar 92,33%. Menurut Sudiarta dan Sulihingtyas (2012) desorpsi ion logam oleh asam mineral melibatkan reaksi pertukaran ion H⁺ dari asam dengan ion logam yang terikat pada gugus fungsi adsorben. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi ikatan ion antara ion Pb^{2+} dengan gugus fungsi pada adsorben NH-MCM-48. Ikatan yang terjadi melalui pertukaran ion merupakan ikatan yang kuat karena itu digunakan pelarut asam kuat seperti HNO₃ dan HCl. Namun karena tingkat keasaman HNO₃ yang lebih kuat dibanding HCl sehingga persen desorpsi menggunakan HNO₃ lebih besar dibandingkan HCl. Pada grafik juga dapat dilihat bahwa H₂O tidak dapat menarik kembali ion Pb^{2+} yang telah diadsorpsi. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi ion logam Pb^{2+} tidak terjadi melalui interaksi fisika melainkan melalui interaksi kimia. Selain itu berdasarkan hasil desorpsi yang dilakukan menggunakan larutan Na₂EDTA 0,3M, jumlah ion Pb^{2+} yang terdesorpsi adalah 72,48 %. Hal ini mengindikasikan adanya pembentukan

kompleks antara ion logam Pb^{2+} dengan ditizon.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, C. V., Destiarti, L., dan Zaharah, T. A., *Recovery Timbal Dengan Ekstraksi Fase Padat Menggunakan Kitosan Terimobilisasi Ditizon*, *JKK*, **3** (2): 1-6.
- Buhani, Narsito, Nuryono, dan Kunarti, E. S., 2009, Amino And Mercapto-Silica Hybrid For Cd(Ii) Adsorption In Aqueous Solution, *Indo J. Chem*, **9** (2): 170-176.
- Fardiaz, S., 1992, *Polusi Air dan Udara*, Kanisius, Yogyakarta.
- Gau, A.A., 2015, *Modifikasi Silika Mesopori MCM-48 dengan 3-Aminopropiltrimetoksisilan dan Uji Adsorpsivitasnya terhadap Ion Ag⁺, Pb²⁺ dan Cr³⁺*, Tesis (tidak diterbitkan), Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Hamid, H., dan Pramudyanto, B., 2007, *Pengawasan Industri dalam Pengendalian Pencemaran Lingkungan*, Granit, Jakarta.
- Handayani, D. S., Jumina, Siswanta, D., Mustofa, 2012, Adsorpsi Ion Logam Pb(II), Cd(II), dan Cr(III) oleh poli 5 allil-kaliks[4]arena tetraester, *J. Manusia dan Lingkungan*, 19(3): 218-225.
- Pongsendana, M., 2014, *Modifikasi Silika Mesopori MCM-48 dengan Gugus Tiol untuk Adsorpsi Ion Logam Ag(I)*, Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Sediawan, W.B., 2000, *Berbagai Teknologi Proses Pemisahan*, Jurusan Teknik Kimia UGM, Yogyakarta.

Sembel, D. T., 2015, *Toksikologi Lingkungan*, CV Andi Offset, Yogyakarta.

Sriyanti, Azmiyawati, C., dan Taslimah, 2005, Adsorpsi Kadmium(II) Pada Bahan Hibrida Tiol-Silika Dari Abu Sekam Padi, *JSKA*, **8** (2): 1-12.

Shim, W., Lee, J. W., dan Moon, H., 2006, Adsorption Equilibrium and Column Dynamics of Vocs on MCM-48 Depending on Pelletizing Pressure, *Microporous and Mesoporous Mater*, **88**, 112-125.

Sudiarta, W. I., dan Sulihingtyas, W. D., 2012, Biosorpsi Cr(III) pada Biosorben Serat Sabut Kelapa Hijau Teramobilisasi EDTA, *Jurnal Kimia*, **6**(1):29-36.

Taba, P., 2001, *Mesoporous Solids as Adsorbent*, PhD Thesis, The University of New South Wales, Australia.

Widowati, W., Sastiono, A., dan Jusuf, R. R., 2008, *Efek Toksik Logam Pencegahan dan Penanggulangan Pencemaran*, Andi, Yogyakarta.